

USO DE UN MODELO BASADO EN EVENTOS PARA EVALUAR LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN UNA CUENCA DE PEQUEÑAS DIMENSIONES

A. Paz González¹, F. Díaz-Fierros Viqueira², B. Soto González³ y E. López Periago³

¹Facultad de Ciencias. Universidad de La Coruña. A Zapateira s/n. 15071 La Coruña. tucho@udc.es

²Facultad de Farmacia. Universidad de Santiago de Compostela.

³Facultad de Ciencias de Orense. Universidad de Vigo.

RESUMEN. Los suelos de cultivo situados en pendiente y desarrollados sobre esquistos del Complejo de Órdenes en Galicia, se consideran sensibles a la acción de la escorrentía y a la erosión hídrica. Ello se debe al efecto conjunto de un clima húmedo con precipitaciones elevadas durante la estación invernal, a suelos de textura franca o franco-limosa que pueden encostrarse y a la topografía ondulada. Para luchar eficazmente en contra de los efectos adversos de la erosión y la escorrentía es importante conocer aquellos períodos de la estación húmeda en que la intensidad de la infiltración es de menor cuantía, en ausencia de cubierta vegetal. En este contexto se utilizó un modelo determinista con base física (LISEM), que funciona asociado a un SIG de tipo raster (PCRaster), para predecir la erosión y la escorrentía. Mediante el modelo LISEM se estimó la conductividad hidráulica a saturación (K_s) en una pequeña cuenca agrícola mediante el método de prueba y error, usando datos de precipitación y caudal. Las series de datos experimentales corresponden a ocho eventos medidos en la cuenca de 10,7 ha denominada Abelar durante el período 1997/1998. Dado que LISEM requiere una cantidad importante de parámetros de entrada, se utilizaron diferentes fuentes de información para obtener estos datos, incluyendo el calibrado del modelo, experiencia previas y nuevas observaciones de campo. En los ocho eventos estudiados la conductividad media de la cuenca se obtuvo usando un procedimiento de prueba y error. Para ello se activó una opción del modelo que permite estimar para cada evento la fracción de la conductividad hidráulica saturada considerada como óptima. De este modo, mediante la interfaz de LISEM, se modificó el porcentaje K_s con respecto al valor de referencia, hasta alcanzar un ajuste visual razonable entre el caudal medido y el simulado. Tras los ajustes, el valor del parámetro E de Nash-and-Sutcliffe (1970) obtenido fue de 0,51 y el valor medio del coeficiente de correlación entre datos medidos y simulados en $r^2 = 0,69$. El valor más bajo de K_s fue 2,48 mm/h y se obtuvo durante un evento considerado como excepcional. En los restantes siete eventos este óptimo osciló entre 3,73 y 12,01 mm/h. La conductividad hidráulica puede presentar una disminución importante en otoño. Sin embargo, las menores intensidades de infiltración a escala de cuenca tienden a ocurrir a finales de invierno y comienzos de la primavera.

En base a estos resultados, se recomienda que las acciones que puedan contribuir a reducir la escorrentía y por tanto la erosión del suelo apliquen durante dicho período, dado que en él los valores de conductividad hidráulica se alejan del óptimo durante un intervalo importante.

ABSTRACT. The combination of a wet climate with elevated winter precipitation, loamy-silt or loamy soils prone to crusting and rolling terrain makes the cultivated slopes of soils developed over Ordenes schist parent material in Galicia sensible to soil erosion and overland flow. To efficiently counteract erosion and runoff, it is important to know when the infiltration rate in the winter season is lowest, in the absence of soil cover. For this purpose, a deterministic, physically-based soil erosion and runoff model (LISEM) coupled to a raster GIS (PCRaster) was used. With the aid of the LISEM model, saturated hydraulic conductivity (K_s) in a small agricultural catchment was estimated by the trial-and-error method from precipitation and discharge data. Experimental data sets were measured during eight events in the 10,7 ha-sized catchment of O Abelar in the winter season of 1997/1998. Since LISEM demands a number of input data, they were retrieved from several sources, including calibration, literature and additional field observations. The catchment-averaged saturated hydraulic conductivity was inversely modelled by trial-and-error for all eight events. For this purpose a model option to estimate the fraction of the optimal saturated hydraulic conductivity was used. The effective percentage of saturated hydraulic conductivity within the LISEM interface was adjusted until a reasonable visually fit was reached between measured and modelled discharge. The model fits had an average Nash-and-Sutcliffe (1970) E of 0,51 and an average r^2 of 0,69 between measured and simulated data was obtained. The lowest value of K_s was 2,48 mm/h which was reached during an event considered to be exceptional. For seven out of eight events this figure was between 3,73 and 12,01 mm/h. The hydraulic conductivity can already drop significantly during late-autumn events. However, in general late winter-early spring is the time with the lowest infiltration rate on catchment level. Thus, management measures to mitigate runoff and erosion are recommend to be applied especially during this period, since hydraulic

conductivity is least optimal for a more prolonged time.

1. Introducción

Entre los diferentes modelos actualmente disponibles para el estudio de la escorrentía y la erosión es importante la diferencia entre dos tipos generales: agregados y distribuidos (Ibáñez et al., 1995; Valcárcel Armesto, et al., 1999). Los primeros no tienen en cuenta la distribución espacial de las variables de entrada, ni de los parámetros y variables de las ecuaciones que se usan para modelizar los fenómenos físicos inherente a los procesos simulados. En cambio, los segundos incorporan datos referidos a la distribución espacial de variables y parámetros de entrada, así como algoritmos que permiten evaluar la influencia que tienen las características espaciales sobre el comportamiento de los procesos simulados. Cuando se dispone de suficientes datos de entrada se considera que los modelos distribuidos son más idóneos; sin embargo, en la práctica, hay ocasiones en las que se obtienen buenos resultados con la aplicación de modelos globales agregados.

Teniendo en cuenta las dimensiones temporales, hay que destacar la distinción entre modelos de eventos y modelos continuos. Los primeros, tratan de simular la respuesta de un sistema natural tras un suceso o evento de precipitación determinado, lo que permite caracterizar la respuesta hidrológica de un segmento de paisaje tras una precipitación de intensidad y duración determinadas (minutos, horas, días). Por el contrario, los modelos continuos pretenden representar la evolución del sistema, sin interrupción, durante periodos más prolongados y sin tener en cuenta las características para cada tormenta o evento de lluvia.

Entre los modelos físicos actualmente disponibles, revisados por diversos autores (Dafonte et al., 1999a; Valcárcel Armesto, 1999) cabe mencionar los siguientes:

WEPP -Water Erosion Prediction Project (Foster and Lane, 1987) que puede ser usado tanto en modo continuo como para un evento simple y para dos escalas: cuenca y ladera.

EUROSEM- el European Soil Erosion Model (Morgan et al., 1993, 1998) que simula eventos simples y permite predecir la erosión del suelo por el agua a escala de parcela o de cuenca, así como evaluar la eficacia de las medidas de protección del suelo.

LISEM (de Roo et al., 1995, 1996 a, b, c; Jetten, 2002), es un modelo que está completamente integrado en un raster tipo SIG, permite simular los fenómenos hidrológicos y el transporte de sedimentos durante e inmediatamente después de un evento de precipitación simple en una cuenca. Dicho modelo simula tanto escenarios en que se considera el uso actual del suelo como aquellos en que se introducen medidas de conservación.

Estos modelos simulan una serie de procesos comunes:

a) Hidrológicos: precipitación, interceptación, infiltración,

almacenamiento superficial y flujo laminar o concentrado.

b) Erosivos: disgregación por la energía cinética de la gota de lluvia, erosión por flujo superficial (entresurcos/flujo laminar); erosión concentrada (iniciación de surcos y evolución de los mismos), transporte y redistribución de sedimentos

A pesar de que todos los modelos tienen objetivos similares, presentan también algunas significativas diferencias. El dato más característico, y que se revela como el más importante para establecer una distinción entre estos los modelos antes mencionados es que LISEM están asociados a un SIG (Sistema de Información Geográfica) y opera discretizando el espacio por medio de celdas.

Las principales razones para usar un SIG son que la escorrentía y los procesos de erosión del suelo varían espacialmente, lo que se tiene en cuenta con el uso de celdas de tamaño adecuado. Por otra parte, la cantidad de datos de entrada que potencialmente se requieren, dado el gran número de celdas, del orden de 1000 en que se divide la cuenca considerada, es enorme y no podrían introducirse fácilmente de forma manual, pero sí al usar un SIG. Las ventajas de usar un SIG se sintetizan en:

1) la posibilidad de modificar los datos de entrada rápidamente, en función de variables como los diferentes usos de la tierra o posibles medidas de conservación, para simular escenarios alternativos al actual.

2) la capacidad para modelizar cuencas mediante un gran número de celdas, lo que permite efectuar simulaciones con mayor detalle.

3) la facilidad para visualizar los resultados mediante mapas. Se pueden producir una serie de mapas que muestren la variación con el tiempo de la distribución espacial de la erosión del suelo, la sedimentación y la escorrentía. Estos mapas se pueden comparar con otros como los mapas de producción, para analizar como afectan las medidas de control a la erosión y la redistribución de sedimentos dentro de la cuenca.

Entre los modelos actualmente disponibles para evaluar la erosión y la escorrentía, LISEM también es el que más posibilidades ofrece para calcular la infiltración, y por lo tanto evaluar el excedente de agua, con seis formas diferentes de realizar dicho cálculo.

En este trabajo, partiendo de datos de precipitación y caudal se determinaron por prueba y error los valores medios de K_s que optimizaban la predicción de una serie de eventos durante la estación húmeda en una cuenca agrícola de pequeñas dimensiones. El valor óptimo de K_s se obtuvo modificando un valor inicial de referencia de este parámetro y manteniendo constantes los restantes parámetros, excepto aquellos que dependían de la estacionalidad, como contenido hídrico inicial, n de Mannng, cobertura vegetal o índice de área foliar.

2. Material y métodos

2.1. Características del área estudiada

Se estudió una pequeña cuenca agrícola denominada

Abelar, localizada en la provincia de A Coruña. Esta cuenca está situada a 430 m de altitud sobre el nivel del mar, aproximadamente, su extensión es de 10,7 ha y su pendiente media 6,9 % (Dafonte Dafonte et al. 1999b). En la Figura 1 se presenta el modelo de elevación digital de la cuenca estudiada. Los suelos desarrollados sobre esquistos del Complejo de Órdenes pueden ser clasificados como Umbrisoles de acuerdo con el sistema FAO-WRB (Deckers et al. 1998); el contenido en materia orgánica presenta una amplia oscilación entre valores mínimos del orden de 3 % en las zonas cultivadas de pendiente más acusada y máximos del orden de 15% en las zonas con mayor hidromorfía. La textura oscila entre franca y franco-limosa, siendo el contenido en arcilla moderado, generalmente inferior al 25% (Dafonte Dafonte et al. 1999 b).



Fig. 1. Modelo de elevación digital de la cuenca de Abelar.

La precipitación total del área estudiada supera los 1300 mm (Dieguez Villar, 1998), y la mayor parte de la misma se concentra entre los meses de octubre a abril.

2.2. El modelo de erosión basado en eventos

LISEM (*L*imburg *S*oil *E*rosion *M*odel, recibe su nombre de la provincia de los Países Bajos, en donde se aplicó por vez primera) es un modelo con base física que simula la escorrentía y la erosión hídrica durante eventos individuales (De Roo *et al.* 1996a, 1996b, 1996c; Jetten 2002). Se trata de un modelo distributivo, es decir tiene en cuenta la distribución espacial de los datos de entrada y también de la escorrentía y la erosión que es evaluada para celdas individuales. Para ello el modelo está asociado a un Sistema de Información Geográfica (SIG) de tipo raster, que se denomina PCRaster (Wesseling *et al.* 1996; Karsenberg 1996). La interacción entre el SIG y el modelo es de tal tipo que el SIG se utiliza como una base de datos, es decir, tanto los mapas de entrada como los de salida de LISEM se introducen y se almacenan, respectivamente, en formato PCRaster. La percepción que el usuario recibe de LISEM es la de una interfase de Windows (Figura 2). LISEM también proporciona estimaciones de caudal y

concentración de sedimentos en función del tiempo, lo que permite elaborar hidrogramas y sedimentogramas. En este estudio se usó la versión 2.12 de LISEM (Basic) y la versión de PCRaster actualizada con fecha 30-10-2002.

LISEM presenta diversas opciones para llevar a cabo las simulaciones, como se observa en la Figura 2. Este estudio se centró en la evaluación del excedente de agua para condiciones de K_s limitante, por lo que se eligió una opción para estimar solo la escorrentía, prescindiendo de la erosión, con lo que se reduce el tiempo de simulación. Dado que la cuenca presenta un pequeño cauce también se activó la opción para simular el efecto del mismo. Además se empleó una tercera opción del modelo para dar cuenta del excedente de agua y asociarlo a la onda cinemática, que permite la entrada el agua de escorrentía en el perfil en aquellas celdas en las que la capacidad de infiltración es más elevada que el valor de la precipitación local y que parece realista para las condiciones estudiadas.

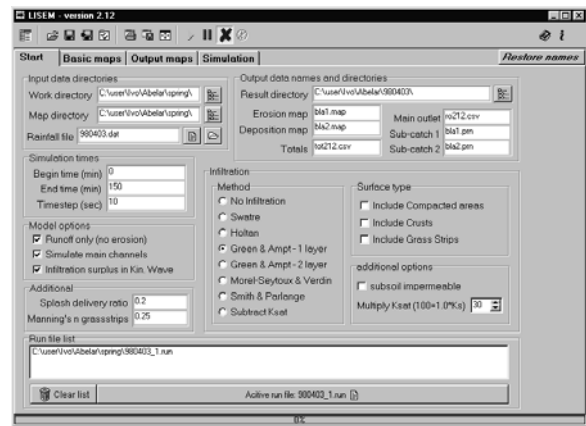


Fig. 2. Interface de la versión 2.12 de LISEM

Por otro lado, de entre los seis métodos diferentes de que dispone LISEM para simular la infiltración se eligió la aproximación propuesta por Green y Ampt (1911) para un solo horizonte; de acuerdo con este método, la ecuación de Darcy se modifica para evaluar la infiltración, resultando:

$$i(t) = K_s \cdot \left[1 + \frac{\varphi(\theta_s - \theta_i)}{I(t)} \right] \quad (1)$$

en donde, $i(t)$ = infiltración instantánea en el tiempo t , t [L/T], K_s = conductividad hidráulica a saturación [L/T], φ = la succión en el frente húmedo [L], (θ_s) = porosidad [1], (θ_i) = contenido hídrico inicial [1] e $I(t)$ = infiltración total acumulada hasta el tiempo t .

Por último, el procedimiento de prueba y error se llevó a cabo multiplicando el valor de K_s introducido como dato de entrada por diferentes valores porcentuales hasta que se alcanza un ajuste satisfactorio entre los caudales simulados y medidos. Esto puede permitir, además, analizar el comportamiento de este parámetro durante la estación húmeda. Dicho de otro modo, el objetivo del estudio se centra en la estimación del valor promedio de K_s para la

cuenca durante cada evento y por extensión la oscilación estacional del mismo.

2.3. Datos de entrada disponibles

El estudio se llevó a cabo usando datos de precipitación y descarga de eventos individuales medidos durante la estación húmeda del año 1997/1998. Se utilizaron un total de ocho eventos (2 en noviembre, 3 en enero, 2 en abril y 1 en junio). Las simulaciones se llevaron a cabo usando el modelo de elevación digital (MED) de la Figura 1 y el mapa de pendientes derivado del mismo. Así mismo se utilizó el mapa de usos de suelos presentado en la Figura 3.

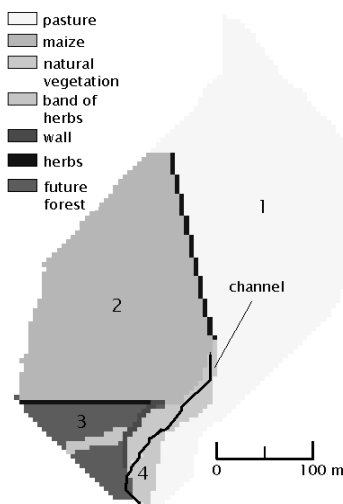


Fig. 3. Mapa de usos del suelo en Abelar

Los principales parámetros de entrada para el suelo y la vegetación que requiere LISEM se obtuvieron de trabajos previos o fueron interpolados, del siguiente modo:

- Conductividad hidráulica saturada (K_s): se partió de un valor de 5 mm/h para la parcela dedicada a maíz y de 30 mm/h para los restantes usos del suelo. Estos valores se basan en medidas previas llevadas a cabo en suelos desarrollados sobre esquistos de Órdenes similares a los de la cuenca estudiada mediante infiltrómetro de tensión (González García, 1998). Conviene tener presente que estos valores son valores óptimos fueron medidos durante la estación seca y que se parte de la hipótesis de que la conductividad a través de la superficie del suelo presenta una oscilación estacional.

- Succión media en el frente de humectación: se empleó un valor uniforme de -8 cm de H_2O para todos los eventos.

- Porosidad del suelo (θ_s) y contenido hídrico inicial (θ_i) (adimensionales): se asumió que θ_s presentaba un valor constante y uniforme igual a 0,45, mientras que θ_i variaba de acuerdo con las condiciones de humedad previas al evento estudiado. Los valores de θ_i utilizados oscilaban en la práctica entre 0,36 (durante las simulaciones de eventos acaecidos en abril) y 0,44 (en condiciones próximas a

saturación durante los meses más lluviosos).

- Parámetro n de Manning (n , adimensional): este parámetro oscila ampliamente tanto en el tiempo como en el espacio. En consecuencia, se usaron valores diferentes según el tipo de vegetación: 0,1 para pradera, 0,25 para la zona no cultivada, 0,13 (invierno) y 0,2 (verano) para el área dedicada a maíz y barbecho (Morgan 1998, Tabla 3.7).

- Rugosidad aleatoria (RR, in cm): este parámetro se consideró constante y uniforme para el conjunto de la cuenca (RR=1,0 cm), en base a los datos experimentales tomados en parcelas de dicha cuenca y de áreas vecinas, (Lado Liñares 1999).

- Índice de área foliar (LAI, adimensional), dada la oscilación estacional de la cubierta vegetal, se asumieron valores de este parámetro: para maíz, 2,5 (invierno) y 3,0 (primavera-verano), para pradera 2,5 y para el área con vegetación natural 3,0, de acuerdo con estimaciones basadas en De Roo *et al.* (1995).

- Porcentaje de cubierta vegetal (Per, adimensional): para el área con maíz 0,2 (invierno) y 0,8 (primavera-verano), para pradera y vegetación natural 0,97.

Además se consideró que el canal permanente de la Figura tenía un valor n de Manning de 0,25, una anchura de 0,5 m y bordes formando un ángulo de 45°.

3. Resultados y discusión

Los hidrogramas correspondientes a dos de los ocho eventos simulados se pueden observar en la Figura 4. Estos eventos, al igual que los restantes, se calibraron mediante los mismos parámetros de entrada, excepto por lo que respecta a dos parámetros: contenido hídrico inicial, que se estimó a partir de la secuencia de precipitación precedente, y porcentaje de K_s , con respecto a los valores medios estimados para el período estival. A continuación se fue modificando el porcentaje del parámetro K_s de modo que los valores de los caudales punta medidos y observados se hacían coincidir. Posteriormente se intentó lograr el ajuste de los hidrogramas medidos y calculados. Se puede comprobar visualmente que las mayores diferencias entre los resultados medidos y simulados ocurren durante la primera fase de cada evento, al comienzo de la fase ascendente del hidrograma.

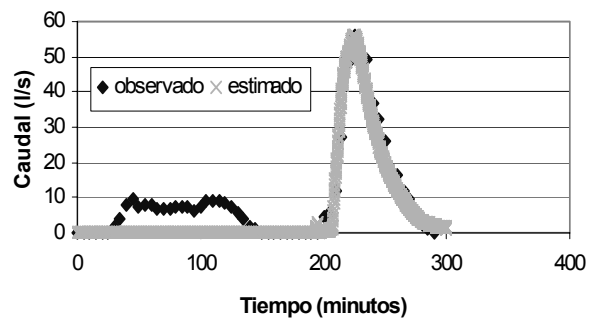


Fig. 4. Hidrogramas medidos y simulados durante el evento del día

En la Tabla 1 se puede observar la bondad del ajuste entre los datos medidos y calculados para ocho hidrogramas sucesivos durante el período 1997-1998. La calidad de la estimación global de los hidrogramas simulados con LISEM se evalúa mediante dos parámetros estadísticos: el coeficiente de correlación entre datos medidos y la predicción del modelo y el coeficiente E, definido por Nash & Sutcliffe (1970) mediante la expresión:

$$E = \frac{\sum_{t=0}^{t=t_{\text{end}}} (Q_o - Q_p)^2}{\sum_{t=0}^{t=t_{\text{end}}} (Q_o - Q_{o,m})^2} \quad (2)$$

en donde: Q_o = descarga media en el tiempo t , Q_p = descarga estimada en el tiempo t , $Q_{o,m}$ = descarga media medida entre los tiempos $t = 0$ y $t = t_{\text{final}}$.

Tabla 1. Parámetros estadísticos usados para evaluar la bondad de las estimas (E= coeficiente de eficiencia según Nash & Sutcliffe (1970); r^2 = coeficiente de correlación; Q_p [l/s]= caudal punta estimado y medido; Q_t [m³] = caudal total estimado y medido) y valores relativos de la conductividad a saturación, K_s (% y mm/h) obtenidos por simulación.

Evento	23-11	24-11	03-01	15-01	18-01	03-04	06-04	01-06
E	0,51	0,19	0,66	0,23	0,64	0,23	0,85	0,75
r^2	0,77	0,41	0,86	0,56	0,76	0,42	0,90	0,81
Q_p obs	14,3	3,19	12,0	20,0	11,1	44,3	55,8	66,1
Q_p prd	14,6	3,42	12,3	26,4	12,2	45,2	55,8	64,9
Q_t obs.	90,1	19,9	32,1	77,9	88,8	101	173	544
Q_t prd.	85,3	16,4	25,9	78,4	68,4	96,0	118	464
K_s (%)	37	12	27	26	18	30	52	58
K_s (mm/h)	7,66	2,48	5,59	5,38	3,73	6,21	10,76	12,01
θ_i	0,38	0,44	0,43	0,40	0,44	0,36	0,36	0,40

Se comprueba, de los resultados consignados en la Tabla 1 que el parámetro E, se comporta como más conservativo, cuando se compara con r^2 . Además, E está considerado como más realista y mejor adaptado desde el punto de vista hidrológico como índice estadístico para evaluar la bondad del ajuste que r^2 . El peor ajuste se obtiene durante el evento registrado el 24-11-1997 (E = 0,19) y el mejor durante el 06-05-1998 (E = 0,85). El evento del 24-11-1997 fue el que presentó una menor magnitud para el conjunto de los registrados, y es bien conocido que la dificultad de modelizar un evento suele aumentar, conforme disminuye el caudal. En general los datos de la Tabla 1 ponen de manifiesto que cuanto mayor es la cuantía del evento, tanto más elevada es la bondad del ajuste. En la misma Tabla se puede comprobar que los caudales punta se pueden ajustar con mucha precisión a los medidos, por el procedimiento de prueba y error y que los caudales totales presentan un ajuste razonable.

En la Figura 5 se representan los resultados más importantes de este ejercicio de modelización: la variación de la fracción de K_s promediada para el conjunto de la cuenca que se estimó para el conjunto de los eventos estudiados en función del tiempo. Se observa que K_s osciló entre 0,12 y 0,58 en términos relativos. El valor más bajo obtenido (0,12 el día 24-11-1997) coincide con la peor estima en base a los resultados de los estadísticos E y r^2 (Tabla 1). Si bien los eventos anteriores al 24-11, en

concreto el evento del 23-11, pudieron causar la disminución de la infiltración, y en consecuencia del valor medio de K_s los pobres resultados de la estima obtenidos hacen sospechar de que durante esta fecha concurren una serie de circunstancias que llevan a un resultado que se considera errático.

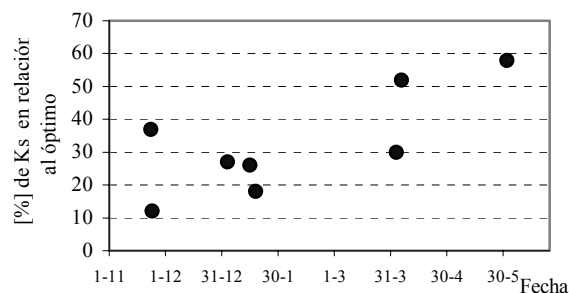


Fig. 5. Porcentaje de K_s promediado en relación al valor de referencia "óptimo" para la cuenca de Abelar en sucesivos eventos.

En todo caso, se pone de manifiesto, sobre todo si se consideran los resultados de los eventos registrados en enero de 1998, junto a los de los meses del otoño de 1997, que en el período invernal se registran valores relativamente bajos de K_s cuando se promedia para el conjunto de la cuenca. Sin embargo, los resultados obtenidos para los eventos registrados entre abril y junio indican un claro aumento de K_s durante la primavera. Estas variaciones de K_s pueden ser atribuidas a diversos procesos naturales, todos ellos susceptibles de inducir modificaciones estacionales del sistema poroso, y en particular de los macroporos. Entre estos procesos cabe señalar la densificación, los procesos de contracción-retracción y la actividad de los organismos del suelo.

Cuando se consideran los valores absolutos de K_s y teniendo en cuenta la proporción de la superficie dedicada a maíz (valor óptimo = 5 mm/h) y a otros usos (valor óptimo = 30 mm/h) se obtiene que, prescindiendo del evento atípico del 24-11-1997, dichos valores oscilan entre 3.7 y 12.0 mm/hora, promediados para la cuenca. Este resultados permiten deducir que en la cuenca agrícola estudiada la infiltración es relativamente baja, lo que debe de estar relacionado con fenómenos como encostrado y compactación que reducen el espacio poroso. Dadas las condiciones climáticas de la zona, la escorrentía debe de ser un fenómeno frecuente si bien las precipitaciones sólo en contadas ocasiones llegan a alcanzar intensidades fuertes.

Los anteriores resultados ponen de manifiesto que LISEM permite estudiar el comportamiento de la cuenca con respecto a uno de los parámetros más importantes: la conductividad hidráulica a saturación; no obstante hay que señalar que dicho modelo requiere una serie muy grande de parámetros de entrada que solo se conocen en términos aproximados, por haber sido interpolados o derivados de la bibliografía y es muy sensible al contenido hídrico inicial.

También se pone de manifiesto que los ocho eventos utilizados son insuficientes para establecer una evolución

detañada de la conductividad hidráulica en función del tiempo, sobre todo si se tiene en cuenta que durante dos de los meses de la estación invernal, febrero y marzo no se registraron eventos de escorrentía. Sin embargo, se pone de manifiesto que K_s tiende a presentar valores bajos en el período otoñal e invernal, en el que se dan circunstancias que no favorecen la infiltración inicial ante un evento intenso, como precipitaciones previas de baja intensidad continuas o muy frecuentes, de modo que el contenido hídrico del suelo se mantiene elevado.

El riesgo de erosión depende, en las condiciones estudiadas, en gran medida de la cubierta vegetal y no solo de factores climáticos y edáficos. De acuerdo con los resultados de este estudio la formación de excedente de agua, como consecuencia de valores de conductividad limitantes, tiende a ser más probable en invierno, durante los meses más lluviosos. Si se consideran las rotaciones tradicionales el porcentaje de cubierta vegetal durante estos meses es muy elevado, lo que reduce el riesgo de erosión; en este caso la erosión suele ser más importante en períodos con valores de K_s más elevados como son los de finales de primavera con el suelo desnudo. Sin embargo, si tras un cultivo anual, el suelo queda a barbecho, como ocurre cada vez con mayor frecuencia en el caso del maíz, el riesgo de erosión durante los meses invernales, como por otra parte ya ha sido comprobado en condiciones de campo (Valcárcel Armesto, 1999; Paz González y Taboada Castro, 2000, 2001) puede ser importante.

4. Conclusiones

El modelo LISEM cuando se usa con la opción de calibrado para la conductividad, K_s , simula razonablemente bien eventos de escorrentía en la cuenca de Abelar, por lo que respecta al caudal punta y caudal total para un amplio rango de valores de los mismos; sin embargo durante la primera fase de los eventos estudiados los hidrogramas estimados no se ajustaron bien a los medidos.

Los valores promedios de K_s en la cuenca estudiada se sitúan en el rango comprendido entre 3,73 y 12,01 mm/h y se aprecia que tienden a presentar oscilación estacional.

Agradecimientos. Este trabajo se efectuó en el marco de los proyectos de investigación PGIDT01 AGR10302 PR, financiado por la Xunta de Galicia y REN2000-04445-C02-01-HD, financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología.

Referencias

Dafonte Dafonte, J., González García, M.A., Paz González, A. y Taboada Castro, M. T. (1999a). Modelos digitales del terreno de dos cuencas grícolas. In: Paz González, A. & Taboada Castro, M.T. (eds.): *Avances sobre el estudio de la erosión hídrica; Colección cursos, congresos, simposios* 52, Universidade da Coruña, 225–232.

Dafonte Dafonte, J., González García, M.A., Taboada Castro, M.T. y Paz González, A. (1999b). Variabilidad espacial de las propiedades generales del suelo en una cuenca agrícola. In: Paz González, A. & Taboada Castro, M.T. (eds.): *Avances sobre el estudio de la erosión hídrica; Colección cursos, congresos, simposios* 52, Universidade da Coruña, 269–278.

Deckers, J.A., Nachtergaele, F.O. y Spaargaren, O. C. (eds.) (1998): *World Reference Base for Soil Resources: Introduction*; Acco, Leuven (Belgium), 165 pp.

De Roo, A.P.J., Wesseling, C.G., Jetten, V.G. y Ritsema, C. J. (1995): *LISEM, a user guide – Version 3.1*; Departement Fysische Geografie, Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, Universiteit Utrecht, Utrecht (The Netherlands), 48 pp.

De Roo, A.P.J., Jetten, V.G., Wesseling, C.G. y Ritsema, C. J. (1996a): LISEM: A physically-based hydrological and soil erosion model incorporated in a GIS; *IAHS Publication* 235, 395-403.

De Roo, A.P.J., Offermans, R.J.E. y Cremers, N.H.D.T. (1996b): LISEM: a single event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. II. Sensitivity analysis, validation and application; *Hydrological Processes* 10 (8), 1119–1126.

De Roo, A.P.J., Wesseling, C.G. y Ritsema, C. J. (1996c): LISEM: a single event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I. Theory, input and output; *Hydrological Processes* 10 (8), 1107–1117.

Dieguez Villar, A. (1998). Estudio del contenido en iones mayoritarios de las aguas de escorrentía de dos cuencas agrícolas. *Tesis de Licenciatura*. Universidade da Coruña. 94 pp.

Foster, G.R. y Lane, L. J. (1987). *User Requirements: USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP)*. NSERL Report No 1. West Lafayette, Ind.: USDA-ARS National Soil Erosion Research Lab.

González García, M. A. (1998). Propiedades hidrodinámicas en zona no saturada y su relación con los procesos hidrológicos. *Tesis Doctoral*. EPS de Lugo. Universidad de Santiago de Compostela. 228 pp.

Green, W.H. y Ampt, G.A. (1911). Studies on soil physics. I. The flow of air and water through soils; *Journal of Agricultural Sciences* 4, 1-24.

Ibañez, J. J., Machado, C., Zucarello, V. y González Huecas, C. (1995). Modelos de simulación y variabilidad espacio-temporal. En: *Análisis de la variabilidad espacio-temporal y procesos caóticos en ciencias medioambientales*. Ibañez, J.J and Machado, C eds. Geofoma Ediciones. Logroño. 111-132.

Jetten, V. G. (2002). *LISEM user manual, version 2.x – Draft version January 2002*; Utrecht Centre for Environment and Landscape Dynamics (UCEL), Universiteit Utrecht, Utrecht (The Netherlands), 48 pp.

Karssenberg, D. (1996). *PCRaster version 2 manual*; Departement Fysische Geografie, Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, Universiteit Utrecht, Utrecht (The Netherlands), 368 pp.

Lado Liñares, M. (1999). Cuantificación de la rugosidad orientada y aleatoria mediante índices y su relación con la degradación del microrelieve del suelo y almacenamiento temporal de agua. *Tesis doctoral*, Universidade da Coruña. 258 pp.

Morgan, R. P. C., Quinton, R. J. y Rickson, R. J. (1993). *EUROSEM: A user guide*. Silsoe College. Cranfield University. Reino Unido.

Morgan, R. P. C., Quinton, R. E., Smith, R. E., Govers, G., Poesen, J. W. A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., Styczen, M.E. y Folly, A.J.V. 1998. *The European soil erosion model and user guide. Version 3.6*. Silsoe College. Cranfield University. Reino Unido.

Nash J.E. y Sutcliffe, J.V. (1970): River flow forecasting through conceptual models. Part I: A discussion of principles; *Journal of Hydrology* 10 (3), 282–290.

Paz González, A. y Taboada Castro, M^a. T. 2000. (eds.). II Congreso sobre Erosión Hídrica. Resúmenes. Universidade da Coruña. IUX Isidro Parga Pondal. 67 pp.

Paz González, A. y Taboada Castro, M^a. T. .2001. (eds.). III Congreso sobre Erosión Hídrica. Resúmenes. Universidade da Coruña. IUX Isidro Parga Pondal. 93 pp.

Valcárcel Armesto, M. (1999). Variabilidad espacial e temporal da erosión en solos de cultivo. *Tesis doctoral*. Universidad de Santiago de Compostela. 266 pp.

Valcarcel Armesto, M., Paz González, A. Dafonte Dafonte, J. y Taboada Castro, M^a T. (1999). Importancia de las prácticas agrícolas en el control de los procesos erosivos y evaluación mediante modelos de la incidencia de las mismas. In: Paz González, A. & Taboada Castro, M.T. (eds.): *Avances sobre el estudio de la erosión hídrica; Colección cursos, congresos, simposios* 52, Universidade da Coruña, 4-34.

Wesseling, C.G., Karssenberg, D., Burrough, P.A. y van Deursen, W.P.A. (1996): Integrating dynamic environmental models in GIS: the development of a Dynamic Modelling Language; *Transactions in GIS* 1 (1), 40–48.